第 37 卷第 6 期 2017 年 3 月 | 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.37,No.6 Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201510242152

吴未, 范诗薇, 胡余挺, 欧名豪.基于成本收益分析的生境网络优化——以苏锡常地区白鹭为例.生态学报,2017,37(6):1786-1795.

Wu W, Fan S W, Hu Y T, Ou M H.A cost-benefit analysis approach to habitat network optimization: a case study of the little egret (*Egretta garzetta*) in the Su-Xi-Chang area.Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):1786-1795.

基于成本收益分析的生境网络优化

——以苏锡常地区白鹭为例

吴 未[1,2,*], 范诗薇[1], 胡余挺[1], 欧名豪[1,2]

1 南京农业大学土地管理学院, 南京 210095

2 农村土地资源利用与整治国家地方联合工程研究中心, 南京 210095

摘要:引入经济学成本收益分析方法对于生境网络优化保护具有重要现实意义。以苏锡常地区白鹭生境网络优化为例,通过分别构建研究区生境网络保护成本与提升收益测算体系、模拟多种情景和优化方案、成本收益分析的方法,实现了满足不同约束条件的优化方案。结果表明:(1)最大收益累积情景下的方案在总收益最高的基础上,实现了保护总成本较低的目的;最佳效益累积情景下的方案在研究区土地资源有限和保护总成本最低的基础上,实现了优化成效最佳的目的;(2)最佳效益累积情景下的方案在实现成本最低的基础上,兼顾到了优化成效的最大化,适宜于土地资源稀缺且城市化快速发展地区;(3)有限效益累积情景作为最佳效益累积情景的基本模式,其优化方案在一定范围内可以兼顾到成本较低和成效较高。将经济学与生态学相结合的网络优化方法,综合考虑了研究区的生态、经济和社会等现实因素,极大的提高了网络优化方案操作的可行性,其思路和方法拓展了网络优化研究视角。但诸多实现因素也决定了成本与收益体系的构建还处于不断完善之中。

关键词:生境网络优化;成本收益分析方法;边际效益;快速城市化地区;白鹭;长三角地区

A cost-benefit analysis approach to habitat network optimization: a case study of the little egret (*Egretta garzetta*) in the Su-Xi-Chang area

WU Wei[1,2,*], FAN Shiwei[1], HU Yuting[1], OU Minghao[1,2]

1 *College of Land Management*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*

2 *National & Joint Local Engineering*, *Research Center for Rural Land Resources Use and Consolidation*, *Nanjing* 210095, *China*

Abstract: The economic approach of cost-benefit analysis plays an important role in analyzing biodiversity conservation, especially in rapidly urbanizing areas. In the existing Chinese academic literature, cost-benefit analyses have been applied in studies on habitat conservation, ecological land protection, and ecological networks. The present study addresses a gap in the research, by determining the effects of a cost-benefit analysis approach on habitat network optimization. Furthermore, this study uses a cross-disciplinary approach between methodologies in economics and ecology, to examine the impacts of the economic approach and ecological processes on network optimization methodology. As a case study, we focused on the Su-Xi-Chang area of the Yangtze River Delta Region, with the little egret (*Egretta garzetta*) as a regional representative species. We hypothesized that adding new habitat patches would improve network connectivity, and help with network optimization. The study assessed the size and the land use type of 35 identified habitat patches, which were the prior research results. The cost of avoiding the transfer from the current habitat into other land use types, especially construction land, was treated as the protect-cost, which was derived from local prices for land acquisition. From the perspective of

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41571176);江苏高校哲学社会科学研究项目(2015SJD096);中央高校基本科研业务费人文社会科学研究基金配套项目(SKPT2015018)

收稿日期:2015-10-24; **网络出版日期**:2016-08-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ww@njau.edu.cn

network structure, the benefit of habitat network connectivity improvement was represented as a comprehensive indicator generated from three different indexes. These indexes included the number of newly added corridors, the betweenness, and the node degree. The protect-cost of each habitat patch could be matched to its corresponding benefit value for different purposes. The study design considered five different conditions and six scenarios. Scenario 1 was formed from the perspective of minimum cost accumulation, whereas scenarios 2 to 5 focused on maximum benefit accumulation, best effectiveness accumulation, and two limited effectiveness accumulations, respectively. Scenario 6 was the ideal condition meaning with all 35 habitat patches being added as the ideal result of habitat network optimization. The results indicate that (1) scenario 2 of maximum benefit accumulation resulted in network optimization with a lower total cost compared to scenario 6. Scenario 3 of best effectiveness accumulation resulted in network optimization with the least protected area, and associated cost. (2) The effects of the scenarios of best effectiveness accumulation, as well as the one of minimum cost accumulation (i.e., scenario 3 and scenario 1, respectively) were similar. However, the total cost of scenario 3 was only 74 percent of that of scenario 1. This indicates that scenario 3 of best effectiveness accumulation maximized effectiveness with the least cost, and was suitable for rapidly urbanizing areas with scarce land resources. (3) The effects of the two scenarios of limited effectiveness accumulation, (i.e., scenario 4 and scenario 5) were in between the effects of scenario 1 of minimum cost accumulation and scenario 2 of maximum benefit accumulation. This indicates that all scenarios of limited effectiveness accumulation would realize the aim of better effectiveness with lower cost. Furthermore, it indicated that scenario 3 of best effectiveness accumulation was gained under special circumstances. In economics, this phenomenon is referred to as the marginal benefit. Overall, the combined method detailed here, along with ecological, economic, and social factors, contributes to habitat network optimization, and highlights the methodology of network optimization.

Key Words: habitat network optimization; cost-benefit analysis; marginal benefit; rapidly urbanizing areas; the little egret (*Egretta garzetta*); Yangtze River Delta Region

生境网络是遏制生境破碎化影响、提高生境质量、保护生物多样性和生态系统健康的重要途径[1-3]。快速城市化地区土地集约化利用、土地利用方式转变以及狭隘观念等人为因素[4]致使现有生境网络遭受严重破坏,物种生境状况不断恶化[5],迫切需要加强生境网络保护与优化研究。

网络优化研究多基于岛屿生物地理理论、异质(集合)种群理论和"斑块-廊道-基质"网络理论[6]以及图谱理论,主要通过采用完善网络构成要素的方法实现[7-10]。这种研究思路忽略了生境网络保护实施过程中经济因素的制约影响。事实上,对于任何技术方案,不进行经济分析,不考虑成本投入和产出效益,很难使其得到良好的实施。将经济学成本收益分析方法引入研究极大的提高了网络优化方案操作的可行性,其思路和方法有益于拓展网络优化研究视角,因此得到众多学者的广泛关注[11-14]。

Armsworth 等[15]采用多元回归模型的方法,测算出小型生境用地的收购和管理成本,从规模经济视角,比选出英国约克郡野生动物栖息地保护规划方案;Drechsler[16]采用 SAEEM 概念模型(a conceptual semi-analytical ecological-economic model)的方法,考察了生境数量的静态时与空间连通性、动态时与时间连续性的两种权衡关系,提出了成本收益视角下生境网络设计的生态经济约束条件。在成本收益分析方法的应用中,Drielsma 等[11]探讨了不同地类对物种迁移阻力成本与生境质量的关系,模拟了栖息地格局的动态生态过程(dynamic ecological processes);Gaaff 等[17]在生态网络经济价值评估的基础上,提出了高生态价值下的土地利用优化配置方案;Sinha 等[12]实现了土地利用覆被变化对野生动物有效生境面积(effective habitat area,EHA)影响的分析;Langhans 等[18]采用成本函数分析的方法,通过对比河流恢复成本和预期生态收益,提出了基于生物多样性保护的瑞士河道整治规划方案。总体上,国外此类研究开展较早,研究的对象包括物种栖息地、生态网络、生境网络等;采用的方法包括计量评估、格局模拟、模型分析等,考察的成本包括了生境用地与其他地类价格差异、恢复与管理生境用地费用、不同地类对物种迁移阻力等,收益则包括了整体生态收益、物种生境

面积、生境质量、网络经济价值等等,涉猎极广。相较而言,国内研究尚处于引介、学习和探索的阶段,且多集中在生境斑块、生态用地以及生态网络的层面,对生境网络的探讨还很少[19-22]。

本文以土地资源紧缺、快速城市化苏锡常地区为研究区域、白鹭 2010 年现状生境网络和识别的新增生境节点为基础,通过构建新增生境斑块保护成本和网络优化提升收益测算体系、多情景模拟和成本收益分析的方法,实现了白鹭生境网络的优化。本文着眼于经济学与生态学相结合的方法,回答:如何运用成本收益方法优化生境网络? 成本收益方法对网络优化研究的作用和意义是什么? 等问题,以期拓展生境网络优化方法论的研究。

1 研究区概况

苏锡常地区位于江苏省南部太湖之滨,总面积 1.75 万 km^2,其中水域面积占 32.5%。地区以占江苏省约 17%的国土面积和人口,实现了约 40%的 GDP 和地方财政收入。2000—2010 年地区农用地比重从 56.69%降至 44.41%、建设用地比重从 14.71%增至 27.82%,土地利用结构和空间布局变化明显,是城市化、经济社会发展快速且人为干扰强烈的地区。

区内野生物种有兽类、两栖爬行类 30 多种、鸟类 170 多种,以鸟类居多。由于水网密布、地表水资源丰富,为优势湿地鸟类提供了大量栖息地。区内主要分布有白鹭、夜鹭、池鹭和牛背鹭 4 种鹭鸟,其中白鹭(*Egretta garzetta*)被列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》名单。中国观鸟记录中心(China Bird Report) 2003—2014 年观测数据显示,区内观测到的白鹭活动地点 77 处,其中无锡斗山茶场和常熟尚湖风景区观测到的数量最多,达 200 多只。研究表明,2000—2010 年期间区内,就白鹭单一物种而言,适宜地类斑块(suitable patch)总面积得到了一定增加,但生境斑块(habitat patch)的总面积减少了,生境网络质量不断下降,生境环境持续恶化[4]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

数据主要包括中国科学院国际科学数据服务平台 2010 年 TM 遥感数据、1∶5 万数字高程 DEM 数据(30 m×30 m)、2010 年苏锡常各区县(市)行政区划图、中国观鸟记录中心 2003—2014 年观测数据、苏锡常 3 市《土地利用总体规划(2006—2020)》以及 2010 年苏锡常 3 市土地征收补偿标准。

TM 影像经解译得到土地利用/覆被数据,结合白鹭的生境特点和数据精度,将区内土地划分为水田、旱地、园地、乔木林地、灌木林地、草地、城乡建设用地、交通用地、滩涂沼泽、湖泊水库、河流、沟渠/运河和其他未利用地 13 类。

2.2 研究方法

2.2.1 基本思路及主要步骤

经济学的成本收益分析(cost-benefit analysis)方法是一个普遍的方法,其前提就是追求效用最大化。在生物多样性保护研究中,就是对物种及其栖息地保护与规划等进行经济价值量化分析的一类研究方法[23-24]。具体到生境网络优化,就是测算出若干方案各自所需投入的保护成本、对应的优化收益[17],从追求“利润”最大化出发,提出最佳方案[13]。

本文以白鹭 2010 年生境网络和识别的新增生境节点[10]为基础,分别以对应的新增生境斑块保护费用为成本、生境网络连接度提升程度为收益,多情景模拟后,得到最佳方案。研究思路及主要步骤包括识别新增生境斑块、测算成本、测算收益、情景模拟 4 个部分。

2.2.2 识别新增生境斑块

将前期成果中识别的 35 个白鹭新增生境节点[10](图 1)与 2010 年 TM 影像图逐一对照,识别并测算出与之对应新增生境斑块的土地利用类型及其面积。

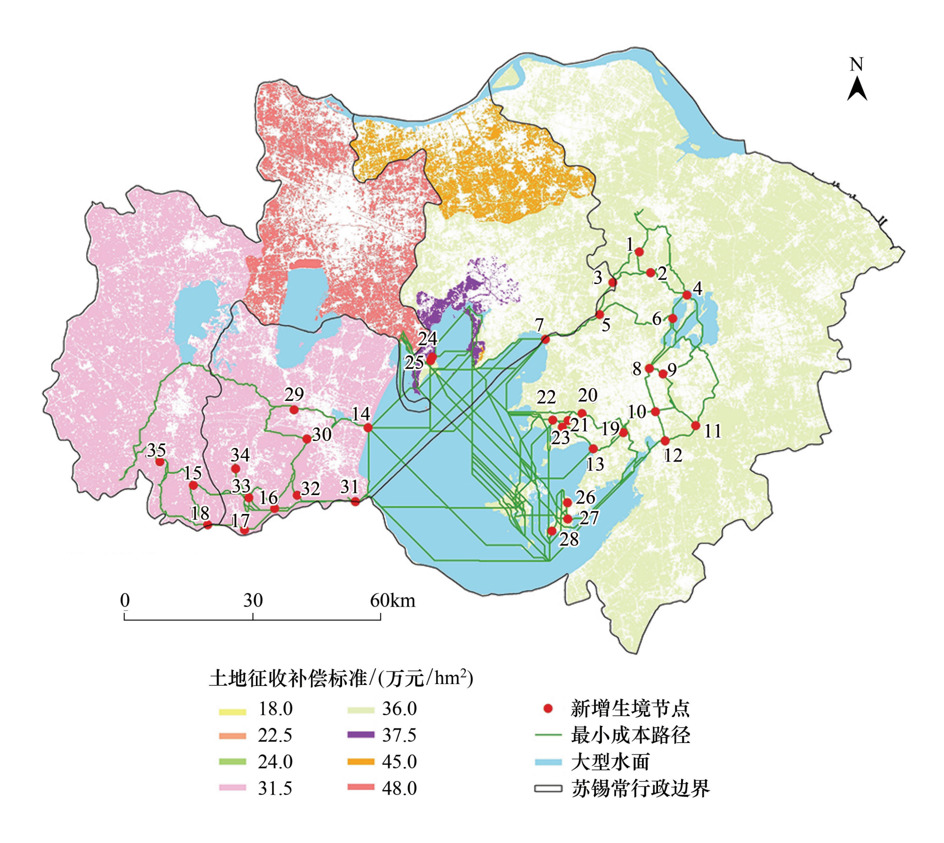


图 1　苏锡常地区新增生境斑块及对应地类土地征收补偿标准

Fig.1　The distribution of little egret´ new habitat patches and their corresponding compensation prices of land acquisition in Su-Xi-Chang area

2.2.3　测算成本

生境网络优化/保护成本通常包括直接成本、间接成本和机会成本[15,25] 3 大类。直接成本主要包括前期成本和管理/运营成本[15]:前期成本指通过交易方式获得生境用地使用权/所有权的成本[26];管理/运营成本指对保护区进行日常管理、运营及相关活动所投入的费用,包括就地保护成本如自然保护区建设成本等、资源持续利用成本如林业重点工程投资等、保护机构运行成本及野生动物救治成本等[18,25]。间接成本包括损害补偿成本、宣传教育成本、科学研究成本以及保护区群管理机构固定资产折旧、保护机构对当地社区交通电力等公益性支出与建设等其他间接成本。机会成本包括土地等资源收益放弃的成本。由于成本类型、构成及计算非常繁琐,且生态效益属于无形资产,使用货币化方式进行计量研究的方法本身也存在着争议[25]。目前尚无成熟的生境网络优化/保护成本计算方法。

本文着眼于生境网络优化的方法论研究,侧重从增设新增生境斑块提高网络连接度实现网络优化目的视角出发[27-28],重点讨论保证新增生境斑块现有土地利用类型不被征用转化为其他土地利用类型特别是建设用地的情形,不涉及管理/运营成本,因此文中直接成本即为前期成本或土地交易价格。考虑到数据可获得性因素,土地交易价格通常由土地征收补偿标准测算得到。由于土地征收补偿标准的测算极为复杂,且存在很多争议[29-31]。为简化研究,论文直接引用苏锡常地区国土资源管理部门公布的 3 市 2010 年土地征收补偿标准为测算依据,得到了研究区生境网络优化/保护的货币化成本情况(图 1)。保护成本计算表达式为:

$$c = a \times p \tag{1}$$

式中,c 为新增生境斑块的保护成本;a 为新增生境斑块对应的地类面积,p 为地类对应的土地征收补偿标准价格。

2.2.4　测算收益

考核收益的指标类型很多且范围广泛。本文侧重比较不同新增生境斑块在提高网络连接度的贡献程度

差异,因此测算的收益指每一块新增生境斑块在增设时对网络连接度提升所带来的对应收益。依据已有成果[26,32-33],从网络结构视角出发,选取了 3 个不同类型的指标,采用综合指数法进行测算(表 1)。

新增生境斑块迁移廊道数量的计算借助 ArcGIS 软件实现;节点度和中介度指数的计算借助 UCINET 软件实现;指标值经极差标准化、等权叠加处理后得到综合值,即提升收益。

表 1 苏锡常地区白鹭生境网络优化收益评价指标及其生态学意义

Table 1 Indicators and their ecological significance for the little egret′s habitat network optimization of Su-Xi-Chang area

评价指标 Indicators	生态学意义 Ecological significance
廊道数量 Corridors	反映物种迁移效率和生境斑块间的连通性
节点度 Node degree	表示网络结构中与某一节点相连的连接线的数量
中介度 Betweenness	表示某一斑块处于其他斑块对之间的频度,反映了节点控制穿越网络景观流的能力

2.2.5 情景模拟

生境网络优化过程中,尤其是在土地资源稀缺、快速城市化地区通常面临着一个严峻挑战,即资源有限条件下,用最少的土地面积/资金实现对一组物种的保护或用给定的资金实现对尽可能多的物种/面积的保护,即物种的“集合覆盖问题(Set Covering Problem, SCP)”和“最大覆盖问题(Maximal Covering Problem, MCP)”[11]。

新增生境节点的重要性不同,因此新增生境节点对应的网络连接度提升收益不同。同时,新增生境节点对应的新增生境斑块在土地利用类型和面积上存在差异,因此新增生境斑块需要的保护成本也不同。故对于每一块新增生境斑块而言,其生境网络优化的贡献“利润”也存在差异,这就形成了不同的情景。

情景一:最小成本累积 将新增生境斑块的保护成本由低至高排列,逐次增设到生境网络中,会得到与之对应的网络连接度收益提升情况。采用成本收益分析方法,获取网络优化的利润最大化,即得到优化方案一。该情景侧重探讨了网络优化的集合覆盖问题。

情景二:最大收益累积 将新增生境斑块的提升收益由高至低排列,逐次增设到生境网络中,会得到与之对应的保护成本累计情况。采用成本收益分析方法,获得网络优化的利润最大化,即得到优化方案二。该情景侧重探讨了网络优化的最大覆盖问题。

情景三:最佳效益累积 对所有新增生境斑块的保护成本与提升收益进行比照并分类,遴选出保护成本较低且提升收益较高的新增生境斑块集合,得到优化方案三。

情景四:有限效益累积 对所有新增生境斑块的效益按照从高至低进行排序,逐个累加,并分别将情景一和情景二下保护总成本设定为约束条件一和约束条件二,得到保护总成本在既定条件下的有限个新增生境斑块的累积集合,得到优化方案四和方案五。

选取用于测度网络连接度的 α、β、γ 指数[10],对以上方案进行比较。

3 结果与分析

3.1 新增生境斑块及其保护成本

表 2 为新增生境斑块保护成本由低至高的排序情况、保护地类、保护成本及其成本情况。由于土地征收补偿标准(18—48 万元/hm^2)差异程度小于新增生境斑块保护面积(10—180 hm^2)差异程度,因此保护面积较小而保护成本较高的现象(如斑块 22、23、24 号)不明显。总体上,保护成本受保护面积差异影响较大,如区内最大的 7 个新增生境斑块把其余 28 个新增生境斑块平均保护面积从 20.50 hm^2 提升了近 1 倍达到 40.57 hm^2、平均保护成本从 7.08 百万元提升了 1 倍达到 14.36 百万元。

3.2 提升收益

表 3 为新增生境斑块提升收益由高至低排序情况、新增廊道数、标准化的节点度、中介度及总收益值。(1)新增廊道较多的新增生境斑块对应的提升收益较好,但有例外如斑块 5、11、18、14 号;(2)新增廊道数与

节点度之间似正相关关系,新增廊道较多时,对应的节点度较高;但有相反的情况如斑块 7 和 28 号;(3)新增廊道数与中介度、节点度与中介度之间也存在上述关系,即似正相关关系与反例现象并存,如斑块 7 和 14 号、斑块 4 和 33 号等。总体上,提升收益较大程度受新增生境斑块的新增廊道数量影响。

表 2　新增生境斑块保护面积及保护成本

Table 2　The protected area and cost of new habitat patches

编号 No.	地类 Type	保护面积/hm^2 Area	保护成本/Million CNY Cost	编号 No.	地类 Type	保护面积/hm^2 Area	保护成本/million CNY Cost
29	湖泊水库	10.27	3.24	31	乔木林地	25.02	7.88
35	乔木林地	10.34	3.26	34	乔木林地	25.40	8.00
32	乔木林地	10.95	3.45	22	乔木林地	24.47	8.81
15	乔木林地	11.87	3.74	25	乔木林地	26.31	9.87
30	乔木林地	12.38	3.90	12	水田	30.11	10.84
18	乔木林地	12.68	3.99	7	园地	31.9	11.48
23	乔木林地	11.85	4.27	14	湖泊水库	36.91	11.63
33	乔木林地	13.76	4.33	11	湖泊水库	32.87	11.83
16	乔木林地	15.68	4.94	28	乔木林地	37.62	13.54
17	乔木林地	16.15	5.09	5	水田	43.90	15.80
21	乔木林地	14.39	5.18	19	乔木林地	63.45	22.84
26	乔木林地	14.79	5.32	2	湖泊水库	94.75	34.11
10	河流	14.85	5.35	3	河流	101.78	36.64
24	乔木林地	14.31	5.37	1	湖泊水库	125.43	45.15
4	水田	15.59	5.61	13	园地	140.02	50.41
6	水田	19.09	6.87	27	乔木林地	148.91	53.61
9	水田	19.92	7.17	20	乔木林地	171.42	61.71
8	水田	20.71	7.46				

表 3　新增生境斑块对应的网络优化指标及收益情况

Table 3　Values of indicators and benefit of new habitat patches when optimizing

编号 No.	新增廊道数 No. of new corridors	节点度 Node degree	中介度 Betweenness	收益值 Benefit	编号 No.	新增廊道数 No. of new corridors	节点度 Node degree	中介度 Betweenness	收益值 Benefit
10	4	1.00	1.00	0.889	21	2	0.78	0.05	0.277
6	4	0.56	0.92	0.716	23	2	0.78	0.05	0.277
2	4	0.56	0.80	0.676	24	2	0.78	0.04	0.273
13	3	0.89	0.72	0.648	25	2	0.78	0.04	0.273
4	4	0.22	0.86	0.582	14	4	0.11	0.00	0.259
9	3	0.89	0.49	0.571	35	2	0.67	0.08	0.250
15	3	0.56	0.54	0.478	20	2	0.67	0.02	0.230
8	4	0.67	0.04	0.459	18	3	0.33	0.02	0.228
16	4	0.67	0.02	0.452	29	2	0.67	0.01	0.227
1	3	0.78	0.19	0.434	22	2	0.67	0.00	0.223
3	4	0.33	0.13	0.376	26	2	0.67	0.00	0.223
12	3	0.67	0.06	0.354	34	2	0.67	0.00	0.223
28	2	1.00	0.06	0.353	11	3	0.33	0.00	0.221
17	3	0.67	0.02	0.341	27	2	0.56	0.00	0.187
7	5	0.00	0.00	0.333	5	3	0.11	0.00	0.148
30	2	0.78	0.17	0.317	32	2	0.33	0.02	0.117
19	2	0.67	0.24	0.303	31	2	0.22	0.00	0.073
33	2	0.89	0.02	0.303					

3.3　多情景对比分析

3.3.1　多情景

情景一：图 2 为最小成本累积情景下总成本与对应总收益变化情况。2 条曲线均呈不断增长趋势。由于新增生境斑块的提升收益与保护成本之间没有直接关联关系，所以总收益曲线波动增长。从成本收益关系分析，并且从成本最低的新增生境斑块 29 号开始累积计算，在单个成本与对应收益“利润”达到最大化时，即图 2 中 2 条曲线在同一点（生境斑块 8 号）间连线距离达到最大值（图 2 中竖向虚线所示），得到累积总成本最小情景下收益最大。该点及之前所有点对应的 18 个新增生境斑块（29、35、32、15、30、18、23、33、16、17、21、26、10、24、4、6、9、8 号）为本情景的优化结果，形成方案一。

情景二：图 3 为最大收益累积情景下总收益与对应总成本变化情况。与情景一类似，2 条曲线分别呈平滑或波动增长。从提升收益最大的新增生境斑块 10 号开始累积计算，在 35 点处达到“利润”最大化（图 3 中竖向虚线所示），即累积总收益最大情景下成本最小。该点及之前所有点对应的 24 个新增生境斑块（10、6、2、13、4、9、15、8、16、1、3、12、28、17、7、30、33、19、23、21、24、25、14、35 号）为本情景的优化结果，形成方案二。

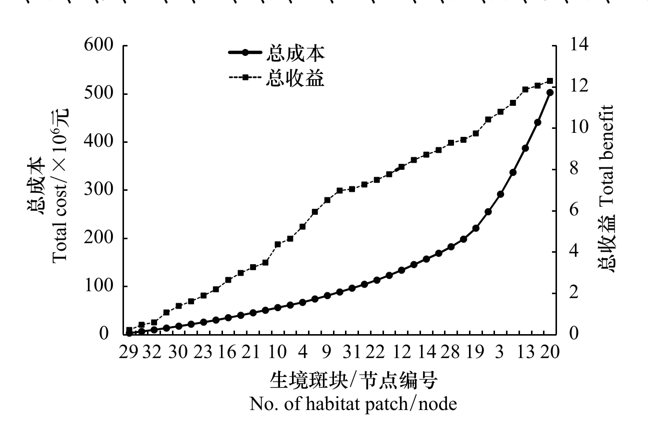


图 2　最小成本累积情景下的总成本与总收益情况

Fig.2　Curves of total cost and benefit based on the minimum cost accumulation, Scenario 1

图 3　最大收益累积情景下的总成本与总收益情况

Fig.3　Curves of total cost and benefit based on the maximum benefit accumulation, Scenario 2

情景三：图 4 为新增生境斑块保护成本与提升收益散点分布情况。其中，横坐标为保护成本、纵坐标为与之对应的提升收益；直线 a 为散点趋势线、虚线 a′为新增生境斑块平均收益、虚线 b 为平均保护成本。虚线 a′和 b 将散点划分到了 4 个区域，对应着 4 种不同的情景：A 区为保护成本较低（低于平均成本）且优化收益较高（高于平均收益）区域，有 9 个斑块（即 4、6、8、9、10、12、15、16、28 号）、B 区为保护成本较低且优化收益较低区域，有 18 个斑块（即 7、11、14、17、18、21、22、23、24、25、26、29、30、31、32、33、34、35 号）、C 区为保护成本较高且优化收益较高区域，有 4 个斑块（即 1、2、3、13 号）、D 区为保护成本较高且优化收益较低区域，有 4 个斑块（即 5、19、20、27 号）。新增生境斑块 17 号的提升收益低于平均收益但高于趋势线故归并到 B 区。很明显，A 区中新增生境斑块效益最佳、D 区中新增生境斑块效益最差。以 A 区 9 个新增生境斑块为本情景优化结果，形成方案三（图 5 中竖向虚线 L_1 所示）。

情景四：由于方案三中 A 区效益最佳的 9 个新增生境斑块保护成本累积之和低于方案一的保护总成本，因此借助趋势线 a 遴选 B 或 C 区中效益最佳的其它新增生境斑块，并自高至低逐次累加，得到新增生境斑块 17、7 和 33 号，满足设定约束条件，形成方案四（图 5 中竖向虚线 L_2 所示）；以此类推，得到方案五（图 5 中竖向虚线 L_3 所示）。

3.3.2　对比分析

表 4 为不同情景生境网络的结构指数情况。为便于比较，将增设所有 35 个新增生境斑块形成的网络优化结果作为理想方案。

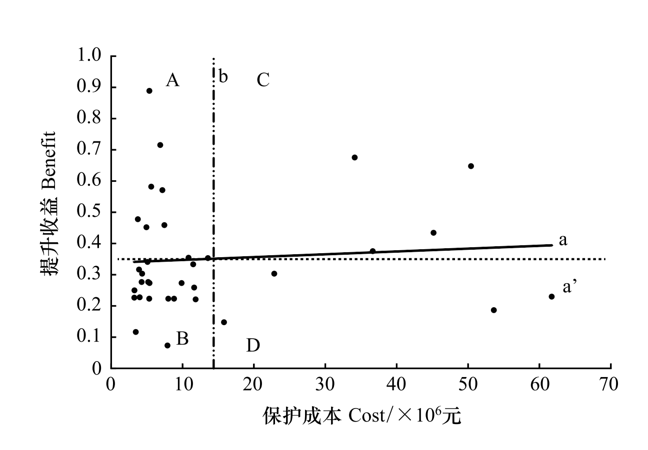


图 4　新增生境斑块保护成本与提升收益散点分布及类型划分

Fig.4　Spatial layout of the new habitat patch′s cost and benefit and their classification

图 5　有限/最佳效益累积情景下的总成本与总收益情况

Fig.5　Curves of total cost and benefit based on the limited/ best effectiveness accumulation, Scenario 3, 4 and 5

(1)与现状比,方案一至五的节点数、廊道数、α、β、γ 指数均得到不同程度提升,说明以上 5 个方案均是现状生境网络的优化方案。

(2)方案三(最佳效益累积情景)在仅为理想方案保护总成本 13.0%的基础上,实现了节点数、廊道数、α、β、γ 指数分别达到了其 72.0%、67.6%、90.4%、93.9%和 94.7%的成效。

(3)方案二(最大收益累积情景)的保护总成本为 4 个优化方案中最高者,但也实现了节点数、廊道数、α、β、γ 指数的最高值;与理想方案相比,在其保护总成本 63.4%的基础上,实现了相同的 α、γ 指数值,β 指数值也达到了 99.7%。

(4)方案一(最小成本累积情景)与方案三相比,保护总成本高于后者,但 α、β、γ 指数值却低于后者,优化成效不够理想。

(5)方案四、五(有限效益累积情景)与方案三相比,在保护总成本分别增长了 31.3%和 363.3%的基础上,节点数、廊道数、α、β、γ 指数均没有达到相应增值,优化成效不显著。

表 4　不同情景生境网络的结构指数情况

Table 4　Habitat network structure indexes of different scenarios

网络 Network	总成本/Million CNY Cost	节点数/个 Nodes	廊道数/条 Corridors	α 指数值 α index	β 指数值 β index	γ 指数值 γ index
现状(Scenario 0)	—	58	109	0.468	1.879	0.649
方案一(Scenario 1)	88.53	76	159	0.571	2.092	0.716
方案二(Scenario 2)	319.04	82	182	0.635	2.220	0.758
方案三(Scenario 3)	65.52	67	140	0.574	2.090	0.718
方案四(Scenario 4)	85.99	70	150	0.600	2.143	0.735
方案五(Scenario 5)	303.57	88	195	0.592	2.132	0.730
理想方案(Scenario 6)	502.69	93	207	0.635	2.226	0.758

综合以上分析,对研究区白鹭生境网络进行优化时:(1)方案二在达到了与理想方案几乎一致的成效情况下,实现了保护总成本较低的目的,为最佳方案;(2)方案三在研究区土地资源有限和保护总成本最低的条件约束下,实现了优化成效最佳的目的,为最佳方案。

4　结论与讨论

本文以苏锡常地区白鹭生境网络优化为例,通过分别构建保护成本与提升收益的测算体系,模拟了多种

网络优化情景和优化方案,经过成本收益分析,得到满足不同约束条件下的推荐方案。结果表明:(1)最大收益累积情景下的方案在总收益最高的基础上,实现了保护总成本较低的目的;最佳效益累积情景下的方案在研究区土地资源有限和保护总成本最低的基础上,实现了优化成效最佳的目的;(2)最佳效益累积情景与最低成本累积情景下的2个方案在优化成效上很接近,但前者总成本仅为后者的74.0%,说明最佳效益累积情景下的方案在实现成本最低的基础上,兼顾到了优化成效的最大化,适宜于土地资源稀缺且城市化快速发展地区;(3)有限效益累积情景下的2个方案的优化成效,介于最小成本累积情景和最大收益累积情景之间,一方面证实了最佳效益累积情景是有限效益累积情景中的一种特殊情况,另一方面也证实了有限效益累积情景在一定范围内可以兼顾到成本较低和成效较高。在经济学上,这个范围的边界十分明确,即网络连接度优化边际效益为"0"或负值时。经济学与生态学相结合的网络优化方法,综合考虑了研究区生态、经济和社会等现实因素,极大的提高了网络优化方案操作的可行性,其思路和方法有助于网络优化研究的深入探索。

研究区内大部分地区特别是苏州不同农用地如耕地、林地、园地等采用了统一的征收补偿标准,致使文中成本受保护地类因素影响不明显,而该方法更适宜于农用地征收补偿标准差异较大的实际情况。现实中生境网络优化的成本测算十分复杂。本文以土地征收补偿标准替代保护现有适宜性生境斑块地类的土地成交价格作为前期成本就研究区而言具有代表性,但并不能替代其真实的成本构成。同时,地类转化成本也是优化成本的一个重要部分,国内现行的城乡建设用地增减挂钩、退耕还林/草/湖、土地整治等均应该纳入直接成本测算体系。

采用网络连接度评价网络优化结果的方法是建立在图论基础上的,是收益评价指标体系[34]中的一类指标。已有相关研究多通过货币化计量方式建立起网络价值分析体系[18],虽然能够更好地运用经济学方法进行分析,但生境网络的优化很难通过货币化方式界定,因此生境网络评价的研究还有待拓展。

成本收益方法为生境网络优化及其可行性研究提供了新的思路,但也面临着许多现实困难,如国有或集体土地所有权的确权问题[35]、生态系统功能维持保护与利益相关者权益问题[36]等。妥善解决好上述问题,将有利于更好地实现物种多样性保护和区域生态安全维持。

致谢:南京农业大学土地管理学院土地经济学邹伟教授和唐焱老师帮助写作,特此致谢。

参考文献(References):

[1] Jongman R H G. Nature conservation planning in Europe: developing ecological networks. Landscape and Urban Planning, 1995, 32(3): 169-183.
[2] Jongman R H G. Landscape planning for biological diversity in Europe. Landscape Research, 2002, 27(2): 187-195.
[3] Jongman R H G, Bouwma I M, Griffioen A, Jones-Walters L, Van Doorn A M. The pan European ecological network: PEEN. Landscape Ecology, 2011, 26(3): 311-326.
[4] Pouzols F M, Toivonen T, Di Minin E, Kukkala A S, Kullberg P, Kuusterä J, Lehtomäki J, Tenkanen H, Verburg P, Moilanen A. Global protected area expansion is compromised by projected land-use and parochialism. Nature, 2014, 516(7531): 383-386.
[5] 吴未, 张敏, 许丽萍, 欧名豪. 土地利用变化对生境网络的影响——以苏锡常地区白鹭为例. 生态学报, 2015, 35(14): 4897-5906.
[6] Forman R T T, Godron M. Patches and structural components for a landscape ecology. BioScience, 1981, 31(10): 733-740.
[7] 胡望舒, 王思思, 李迪华. 基于焦点物种的北京市生物保护安全格局规划. 生态学报, 2010, 30(16): 4266-5276.
[8] Zetterberg A, Mörtberg U M, Balfors B. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning and design. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(4): 181-191.
[9] Rubio L, Saura S. Assessing the importance of individual habitat patches as irreplaceable connecting elements: an analysis of simulated and real landscape data. Ecological Complexity, 2012, 11: 28-37.
[10] 吴未, 张敏, 许丽萍, 欧名豪. 基于不同网络构建方法的生境网络优化研究——以苏锡常地区白鹭为例. 生态学报, 2016, 36(3): 844-853.
[11] 王宜成. 最优化设计连续的自然保护区. 生态学报, 2011, 31(17): 5033-5041.
[12] Drielsma M, Ferrier S, Manion G. A raster-based technique for analysing habitat configuration: the cost-benefit approach. Ecological Modelling, 2007, 202(3/4): 324-332.

[13] Sinha P, Kumar L, Drielsma M, Barrett T. Time-series effective habitat area (EHA) modeling using cost-benefit raster based technique. Ecological Informatics, 2014, 19: 16-25.

[14] Drechsler M, Wätzold F. Applying tradable permits to biodiversity conservation: effects of space-dependent conservation benefits and cost heterogeneity on habitat allocation. Ecological Economics, 2009, 68(4): 1083-1092.

[15] Armsworth P R, Cantú-Salazar L, Parnell M, Davies Z G, Stoneman R. Management costs for small protected areas and economies of scale in habitat conservation. Biological Conservation, 2011, 144(1): 423-529.

[16] Drechsler M. Trade-offs in the design of cost-effective habitat networks when conservation costs are variable in space and time. Biological Conservation, 2011, 144(1): 479-589.

[17] Gaaff A, Reinhard S. Incorporating the value of ecological networks into cost-benefit analysis to improve spatially explicit land-use planning. Ecological Economics, 2012, 73: 66-74.

[18] Langhans S D, Hermoso V, Linke S, Bunn S E, Possingham H P. Cost-effective river rehabilitation planning: optimizing for morphological benefits at large spatial scales. Journal of Environmental Management, 2014, 132: 296-303.

[19] 王昌海, 温亚利, 李强, 司开创, 胡崇德. 秦岭自然保护区群成本效益研究(Ⅰ)——成本效益比较. 资源科学, 2012, 34(5): 836-843.

[20] 王昌海, 曹世雄, 温亚利, 李强, 司开创, 胡崇德. 秦岭自然保护区群成本效益研究(Ⅱ)——成本效益预测. 资源科学, 2012, 34(7): 1362-1368.

[21] 王昌海, 崔丽娟, 马牧源, 毛旭锋. 湿地资源保护经济学分析——以北京野鸭湖湿地为例. 生态学报, 2012, 32(17): 5337-5344.

[22] 张蕾, 苏里, 汪景宽, 程铭. 基于景观生态学的鞍山市生态网络构建. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1337-1343.

[23] Bladt J, Strange N, Abildtrup J, Svenning J C, Skov F. Conservation efficiency of geopolitical coordination in the EU. Journal for Nature Conservation, 2009, 17(2): 72-86.

[24] Naidoo R, Ricketts T H. Mapping the economic costs and benefits of conservation. PLoS Biology, 2006, 4(11): e360.

[25] 王昌海, 温亚利, 李强, 司开创, 胡崇德. 秦岭自然保护区群保护成本计量研究. 中国人口 资源与环境, 2012, 22(3): 130-136.

[26] Cook E A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. Landscape and Urban Planning, 2002, 58(2-5): 269-280.

[27] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 王红扬, 周艳妮, 秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化. 生态学报, 2011, 31(10): 2863-2874.

[28] 许文雯, 孙翔, 朱晓东, 宗跃光, 李杨帆. 基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别. 生态学报, 2012, 32(4): 1264-1272.

[29] 陈莹, 张安录. 农地转用过程中农民的认知与福利变化分析——基于武汉市城乡结合部农户与村级问卷调查. 中国农村观察, 2007, (5): 11-21, 37-37.

[30] 王小映, 贺明玉, 高永. 我国农地转用中的土地收益分配实证研究——基于昆山、桐城、新都三地的抽样调查分析. 管理世界, 2006, (5): 62-68.

[31] 陈莹, 谭术魁, 张安录. 公益性、非公益性土地征收补偿的差异性研究——基于湖北省 4 市 54 村 543 户表户问卷和 83 个征收案例的实证. 管理世界, 2009, (10): 72-79.

[32] 王海珍, 张利权. 基于 GIS、景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划. 植物生态学报, 2005, 29(1): 144-152.

[33] Baranyi G, Saura S, Podani J, Jordán F. Contribution of habitat patches to network connectivity: redundancy and uniqueness of topological indices. Ecological Indicators, 2011, 11(5): 1301-1310.

[34] Théau J, Bernier A, Fournier R A. An evaluation framework based on sustainability-related indicators for the comparison of conceptual approaches for ecological networks. Ecological Indicators, 2015, 52: 444-557.

[35] 刘晴, 王冬艳, 叶鑫, 李茗薇. 明确产权主体为前提的农村集体土地所有权确权发证研究——以吉林省农安县为例. 农村经济, 2013, (4): 42-55.

[36] Li C, Zheng H, Li S Z, Chen X S, Li J, Zeng W H, Liang Y C, Polasky S, Feldman M W, Ruckelshaus M, Ouyang Z Y, Daily G C. Impacts of conservation and human development policy across stakeholders and scales. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(24): 7396-7401.